

## Method of anisotropically etching silicon

Patent Number: US5501893  
Publication date: 1996-03-26  
Inventor(s): LAERMER FRANZ [DE]; SCHILP ANDREA [DE]  
Applicant(s): BOSCH GMBH ROBERT [DE]  
Requested Patent: DE4241045  
Application Number: US19940284490 19940805  
Priority Number(s): DE19924241045 19921205; WO1993DE01129 19931127  
IPC Classification: C25F3/12; B44C1/22  
EC Classification: H01L21/3065, H01L21/3065B, H01L21/308D2  
Equivalents: EP0625285 (WO9414187), B1, JP7503815T, WO9414187

---

### Abstract

---

PCT No. PCT/DE93/01129 Sec. 371 Date Aug. 5, 1994 Sec. 102(e) Date Aug. 5, 1994 PCT Filed Nov. 27, 1993 PCT Pub. No. WO94/14187 PCT Pub. Date Jun. 23, 1994. A method of anisotropic plasma etching of silicon to provide laterally defined recess structures therein through an etching mask employing a plasma, the method including anisotropic plasma etching in an etching step a surface of the silicon by contact with a reactive etching gas to removed material from the surface of the silicon and provide exposed surfaces; polymerizing in a polymerizing step at least one polymer former contained in the plasma onto the surface of the silicon during which the surfaces that were exposed in a preceding etching step are covered by a polymer layer thereby forming a temporary etching stop; and alternately repeating the etching step and the polymerizing step. The method provides a high mask selectivity simultaneous with a very high anisotropy of the etched structures.

---

Data supplied from the esp@cenet database - I2

19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Patentschrift  
10 DE 42 41 045 C 1

51 Int. Cl.<sup>5</sup>:  
C 23 F 4/00  
H 01 L 21/308  
C 30 B 33/12

21 Aktenzeichen: P 42 41 045.2-42  
22 Anmeldetag: 5. 12. 92  
43 Offenlegungstag: —  
45 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 26. 5. 94

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:

Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

72 Erfinder:

Lärmer, Franz, Dr., 7000 Stuttgart, DE; Schilp,  
Andrea, 7070 Schwäbisch Gmünd, DE

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht gezogene Druckschriften:

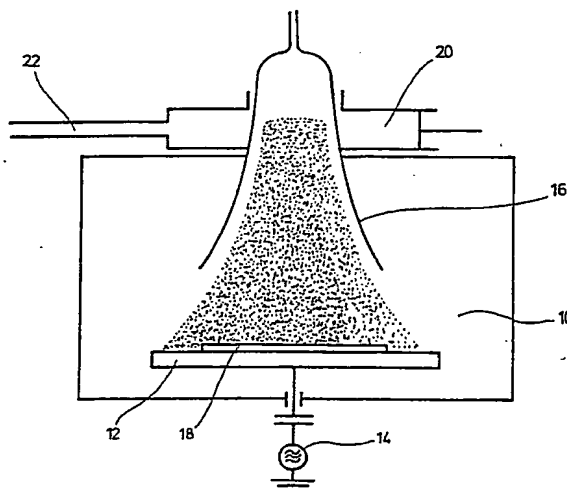
DE	37 06 127 C2
DE	42 04 848 A1
DE	42 02 447 A1
DE	39 40 083 A1
DE	36 13 181 A1
US	48 55 017
US	47 84 720

54 Verfahren zum anisotropen Ätzen von Silicium

57 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum anisotropen Ätzen von mit einer Ätzmaske definierten Strukturen, vorzugsweise lateral exakt definierten Ausnehmungen in Silicium mittels eines Plasmas.

Es ist vorgesehen, bei einer hohen Maskenselektivität gleichzeitig eine sehr hohe Anisotropie der geätzten Strukturen zu erreichen.

Dazu ist vorgesehen, daß der anisotrope Ätzvorgang in separaten, jeweils alternierend aufeinanderfolgenden Polymerisations- und Ätzschritten getrennt durchgeführt wird.



DE 42 41 045 C 1

DE 42 41 045 C 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum anisotropen Ätzen von Silicium nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

Es ist bekannt, in Siliciumsubstrate, die vorzugsweise in der Halbleitertechnik angewendet werden, definierte Strukturen, beispielsweise Gräben, Kämme, Zungen, Biegebalken oder ähnliches mit geringer bis mittlerer Selektivität anisotrop einzuzätzen.

Die einzelnen einzuzätzenden Strukturen werden üblicherweise durch auf das Siliciumsubstrat aufgebrachte Ätzmasken über sogenannte Maskierschichten, beispielsweise einer Photolackschicht, definiert.

Bei der anisotropen Ätztechnik ist es notwendig, zu einer lateral exakt definierten Ausnehmung im Silicium zu kommen. Diese in die Tiefe gehenden Ausnehmungen müssen möglichst genau senkrechte Seitenabschlüsse besitzen. Dabei dürfen die Ränder der Maskierschichten, die diejenigen Siliciumsubstratbereiche abdecken, die nicht geätzt werden sollen, nicht unterätzt werden, um die laterale Genauigkeit der Strukturübertragung von der Maske ins Silicium so hoch wie möglich zu halten. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Ätzung also nur auf dem Strukturgrund, nicht aber an den bereits erzeugten Seitenwänden der Strukturen fortschreiten zu lassen.

Hierzu ist bereits vorgeschlagen worden, das Ätzen von Profilen in Siliciumsubstraten mit einem Plasmaätzverfahren durchzuführen. Dazu werden in einem Reaktor mit Hilfe einer elektrischen Entladung in einem Reaktivgasgemisch chemisch reaktive Spezies und elektrisch geladene Teilchen (Ionen) erzeugt. Die so generierten, positiv geladenen Kationen werden durch eine elektrische Vorspannung, die am Siliciumsubstrat anliegt, zum Substrat hin beschleunigt und fallen annähernd senkrecht auf die Substratoberfläche und fördern auf dem Ätzgrund die chemische Umsetzung der reaktiven Plasmaspezies mit dem Silicium.

Durch den nahezu senkrechten Einfall der Kationen soll die Ätzung an den Seitenwänden der Strukturen entsprechend langsam — bzw. im Optimalfall überhaupt nicht — voranschreiten.

Es ist bekannt, für diese Plasmaätzverfahren ungefährliche und prozeßstabile Reaktivgase auf Fluorchemiebasis einzusetzen. Dabei ist jedoch sehr nachteilig, daß diese auf Fluorchemiebasis wirkenden Reaktivgase zwar eine sehr hohe Ätzgeschwindigkeit und eine hohe Selektivität ermöglichen, aber ein ausgeprägtes isotropes Ätzverhalten zeigen.

Die im Plasma generierten Fluorradikale weisen dabei gegenüber dem Silicium eine so hohe spontane Reaktionsgeschwindigkeit auf, daß auch die Strukturkanten (Seitenflächen) schnell angeätzt werden und es somit zu der unerwünschten Unterätzung der Maskenkanten kommt.

Weiterhin ist bereits vorgeschlagen worden, die Seitenwände während der Ätzung mit gleichzeitig im Plasma befindlichen Polymerbildnern zu bedecken und durch diesen Polymerfilm zu schützen. Da sich dieser Polymerfilm auch auf dem Ätzgrund bilden würde, soll ein beständiger Ioneneinfall diesen von Polymer freihalten und die Ätzung dort ermöglichen. Hierbei ist jedoch nachteilig, daß die dem Plasma zugesetzten Polymerbildner, die sich zum Teil aus dem Fluorträger selbst durch Abspaltung von Fluorradikalen bilden oder die aus bewußt zugesetzten ungesättigten Verbindungen entstehen oder aus erodiertem organischen Maskenma-

terial (z. B. Photolack) stammen, gegenüber den Fluorradikalen als Rekombinationspartner auftreten. Durch diese, ein chemisches Gleichgewicht anstrebende Rückreaktion wird ein erheblicher Teil des für die Ätzung benötigten Fluors neutralisiert, während gleichzeitig auch ein entsprechender Anteil der für die Seitenwandpassivierung benötigten Polymerbildner verlorengeht. Hierdurch wird insgesamt die mit diesem Verfahren erzielbare Ätzgeschwindigkeit merklich gesenkt.

Diese Abhängigkeit der ätzenden Fluorradikale zu den ungesättigten Polymerbildnern im Plasma läßt die Ätzgeschwindigkeiten und die Ätzprofile von der freien zu ätzenden Siliciumsubstratfläche abhängig werden. Weiterhin ist noch nachteilig, daß die im Plasma anwesenden, die Polymerbildner ergebenden, ungesättigten Spezies bevorzugt bestimmte Maskenmaterialien ätzen und so die Selektivität, also das Verhältnis von Siliciumätzgeschwindigkeit zur Maskenätzgeschwindigkeit, verschlechtern. Darüber hinaus erfolgt ein ungleichmäßiger Seitenwandschutz, so werden die Seitenwände unmittelbar am Maskenrand bevorzugt mit Polymer beschichtet und somit die Seitenwand in diesem Bereich besser geschützt als in fortschreitender Ätztiefe der Strukturen.

Damit nimmt in größeren Tiefen die Polymerbedeckung der Seitenwände rasch ab und es erfolgt dort eine Unterätzung mit der Folge, daß flaschenartige Ätzprofile entstehen.

Anstelle des Einsatzes von Reaktivgasen auf Fluorbasis ist bereits vorgeschlagen worden, Reaktivgase auf Basis weniger reaktionsfreudiger Halogene, insbesondere Chlor und Brom, bzw. Reaktivgase, die im Plasma Chlor bzw. Brom freisetzen, einzusetzen.

Diese Reaktivgase bieten zwar den Vorteil, da deren im Plasma gebildete Radikale eine wesentlich geringere spontane Umsetzung mit Silicium zeigen und erst mit gleichzeitiger Ionenunterstützung zu einer Ätzung führen, daß sie, da die Ionen nahezu senkrecht auf das Siliciumsubstrat auftreffen, im wesentlichen nur auf dem Strukturgrund und nicht an den Seitenwänden der Struktur ätzen. Es besteht jedoch der Nachteil, daß diese Reaktivgase außerordentlich empfindlich gegenüber Feuchtigkeit reagieren.

Damit sind nicht nur aufwendige Einschleusvorrichtungen für die Siliciumsubstrate in dem Reaktor notwendig, sondern auch die Leckrate der gesamten Ätzanlage muß extrem niedrig gehalten werden. Schon das geringste Auftreten von Reaktorfeuchtigkeit führt zu einer Mikrorauigkeit auf dem Siliciumätzgrund infolge lokaler Siliciumoxydation und damit zum völligen Erliegen der Ätzung.

Aus der DE 42 04 848 A1 ist ein Verfahren zur Nachätzbehandlung einer Halbleitervorrichtung bekannt, bei dem nach dem Ätzen in einem Ätzbereich eine reaktive chemische Verbindung auf der Halbleitervorrichtung ausgebildet wird. Vor dem Entfernen der geätzten Halbleitervorrichtung aus dem Ätzbereich wird hierbei ein Passivierungsmittel in den Ätzbereich eingeführt, welches Silicium-Tetrafluorid enthält. Die schwacher reaktiven Halogene Chlor und/oder Brom bilden, wenn sie zum Ätzen von Silicium oder metallischen Leiterbahnen benutzt werden, an den Waferoberflächen gut haftende Adsorbate oder Verbindungen (zum Beispiel  $\text{SiCl}_x$ ,  $\text{AlCl}_x$ ), die nach dem Ausschleusen der Wafer aus den Prozeßanlagen mit der umgebenden Luftfeuchtigkeit reagieren. Bei dieser Umsetzung mit Wasser entstehen aggressive Verbindungen, zum Beispiel  $\text{HCl}$ , die zu einer Korrosion führen können. Durch die Einwirkung

von Fluor auf den Wafer vor dem Ausschleusen aus den Prozeßanlagen werden die Adsorbate abgebaut, das heißt zu gut flüchtigen Verbindungen umgewandelt, bevor der Wafer in Kontakt mit der Atmosphäre kommt.

Die US-PS 4 784 720 und die US-PS 4 855 017 beschreiben Verfahren des reaktiven Ionenätzprozesses zum anisotropen Siliciumätzen mit einer Brom-/Chlorchemie. In den beschriebenen Verfahren wird ein hoher Prozeßdruck von 100 bis 750 mTorr benutzt, was zur Folge hat, daß ein relativ hoher Anteil der generierten Ionen nicht senkrecht auf die Substratoberfläche einwirkt, sondern durch Stöße mit neutralen Teilchen in der Gasphase abgelenkt auf die seitlichen Ätzflächen auftrifft, so daß auch dort ein ionenunterstütztes Ätzen auftritt. Die hierdurch erforderlich werdende Seitenwandpassivierung, welche durch eine selektive Oberflächenumwandlung oder eine aktive Schichtabscheidung erreicht wird, ist grundsätzlich bekannt.

Die DE-PS 37 06 127 beschreibt ein diskontinuierliches Ätzverfahren zur Ausbildung einer Vertiefung mit einem großen Verhältnis von Tiefe zu Breite. Diese Ausbildung erhält man durch reaktive Ionenätzstufen von kurzer Dauer durch abwechselndes Beenden und Wiederaufnehmen der elektrischen Entladung. Es wird hierbei jeweils nach einer gewissen Ätzzeit eine Ätzpause eingelegt, während der sich die Reaktionsprodukte aus dem Ätzbereich verflüchtigen können. Die Wechselwirkung von Ätzprodukten, die sich sonst in schmalen Ätzgräben anreichern, mit den eigentlichen Ätzspezies wird dadurch vermindert und eine geringere Abhängigkeit der Ätzgeschwindigkeit von der Strukturbreite erreicht.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren der gattungsgemäßen Art zu schaffen, mit dem auf Fluorchemiebasis eine hohe anisotropische Ätzung von Siliciumsubstraten bei gleichzeitig hoher Selektivität erreicht werden kann.

Erfindungsgemäß wird die Aufgabe durch die kennzeichnenden Merkmale des Anspruchs 1 gelöst.

Infolge der Durchführung der anisotropen Ätzung in separaten, jeweils alternierend aufeinanderfolgenden Ätz- und Polymerisationsschritten werden vorteilhafterweise die gleichzeitige Anwesenheit von Ätzspezies und Polymerbildnern im Plasma vollkommen vermieden. So können mit sehr hohen Ätzgeschwindigkeiten tiefe Strukturen mit senkrechten Kanten in Siliciumsubstraten realisiert werden.

Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den in den Unteransprüchen aufgeführten Merkmalen.

Durch das erfindungsgemäße Verfahren muß beim Ätzschritt keinerlei Rücksicht auf ein bestimmtes Verhältnis von gesättigten zu ungesättigten Spezies, also von Fluorradikalen zu Polymerbildnern, genommen werden, so daß der eigentliche Ätzschritt an sich hinsichtlich Ätzgeschwindigkeit und Selektivität optimiert werden kann, ohne daß die Anisotropie des Gesamtprozesses darunter leidet.

In vorteilhafter Ausgestaltung der Erfindung werden die Siliciumsubstrate während der Ätzschritte und wahlweise auch während der Polymerisationsschritte mit Ionenenergie bombardiert. Durch diese gleichzeitige Bombardierung mit Ionenenergie wird vorteilhaft erreicht, daß auf dem Ätzgrund sich kein Polymer bilden kann, so daß während des Ätzschrittes eine höhere Ätzgeschwindigkeit erreicht werden kann, da eine vorhergehende notwendige Zersetzung der Polymerschicht auf dem Ätzgrund nicht mehr notwendig ist.

Es hat sich gezeigt, daß ein sehr gutes anisotropes

Ergebnis mit außerordentlich niedriger Ionenenergie erreicht werden kann. Infolge der nur geringen benötigten Ionenenergie ist eine ausgezeichnete Maskenselektivität erreichbar.

Da die durch das erfindungsgemäße Verfahren möglichen hohen Ätzgeschwindigkeiten zu einer stark exothermen chemischen Umsetzung von Fluorradikalen mit Silicium führen, kann es zu einer beträchtlichen Erwärmung des Siliciumsubstrats kommen.

Vorteilhafterweise wird das Siliciumsubstrat während des Ätzvorgangs, vorzugsweise durch einen Heliumgasstrom, gekühlt. Durch die gleichzeitige Kühlung des Siliciumsubstrats während des Ätzvorgangs können die Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens, nämlich eine sehr hohe Ätzgeschwindigkeit bei gleichzeitig hoher Selektivität, voll ausgenutzt werden.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand einer Zeichnung, die schematisch den Aufbau einer für das Verfahren einsetzbaren Ätzvorrichtung zeigt, näher erläutert.

Die Figur zeigt eine Ätzkammer 10, in der eine Substratelektrode 12 angeordnet ist, die mit einer Hochfrequenzspeisung 14 verbunden ist.

In die Ätzkammer 10 ragt weiterhin ein Surfatron 16 hinein. Im Wirkbereich des Surfatrons 16 ist auf der Substratelektrode 12 ein Siliciumsubstrat 18 angeordnet. Das Surfatron 16 ist mit einem Resonator 20 zur Mikrowellenplasmaanregung gekoppelt. Die Anlage weist weiterhin einen Hohlleiter 22 zum Heranführen eines Reaktivgases auf.

Das erfindungsgemäße Verfahren zum anisotropen Ätzen von Siliciumsubstrat läuft nunmehr auf folgende Weise ab.

Der Übersichtlichkeit halber wird bei der nun folgenden Verfahrensbeschreibung auf einzelne Bezugnahmen zu der Ätzkammer 10, in der die Verfahrensschritte ablaufen, verzichtet.

Die Ätzkammer 10 ist auch nur beispielhaft ausgewählt worden, und die Erfindung bezieht sich im einzelnen nicht auf den konkreten Aufbau der Ätzkammer 10. Das erfindungsgemäße Verfahren kann selbstverständlich auch mit einer analogen, die einzelnen Verfahrensschritte vollziehenden Vorrichtung durchgeführt werden.

Ein entsprechend vorbereitetes Siliciumsubstrat, das heißt ein mit einer Ätzmaske, beispielsweise aus Photoack, beschichtetes Siliciumsubstrat, wobei die Ätzmaske die Bereiche des Siliciumsubstrats freiläßt, die anisotrop eingätzt werden sollen, wird einem ersten Ätzschritt ausgesetzt.

Dazu wird ein Gemisch von beispielsweise Schwefelhexafluorid  $\text{SF}_6$  und Argon Ar eingesetzt, das einen Gasfluß zwischen 0 und 100 Norm-cm<sup>3</sup> und einen Prozeßdruck zwischen 10 und 100 µbar aufweist. Die Plasmaerzeugung erfolgt hierbei vorzugsweise mit einer Mikrowelleneinstrahlung bei Leistungen zwischen 300 und 1200 W (2,45 GHz).

Gleichzeitig wird an die Substratelektrode eine Substratvorspannung zur Ionenbeschleunigung angelegt. Die Substratvorspannung liegt vorzugsweise zwischen 5 und 30 V und kann mit einer Hochfrequenzspeisung (13,56 MHz) bei Leistungen zwischen 2 und 10 W erreicht werden.

Während des Ätzschrittes werden in dem Reaktor — hier Surfatron — mit Hilfe einer elektrischen Entladung in dem Gemisch aus Schwefelhexafluorid und Argon chemisch reaktive Spezies und elektrisch geladene Teilchen (Ionen) erzeugt.

Die so generierten, positiv geladenen Kationen wer-

den durch die an der Substratelektrode angelegte elektrische Vorspannung zum Siliciumsubstrat hin beschleunigt und fallen annähernd senkrecht auf die durch die Ätzmaske freigelassene Substratoberfläche ein und fördern die chemische Umsetzung der reaktiven Plasmaspezies mit dem Silicium.

Der Ätzschritt kann z. B. so lange durchgeführt werden, bis eine Äztiefe von ca. 2–3  $\mu\text{m}$  Tiefe erreicht ist.

Im Anschluß wird ein erster Polymerisationsschritt mit einem Gemisch aus beispielsweise Trifluormethan  $\text{CHF}_3$  und Argon Ar durchgeführt. Das Gemisch besitzt dabei einen Gasfluß von vorzugsweise 0 bis 100 Norm- $\text{cm}^3$  und einen Prozeßdruck zwischen 10 und 100  $\mu\text{bar}$ . Über den Resonator wird bei einer Leistung zwischen vorzugsweise 300 und 1200 W eine Mikrowelleneinspeisung und damit ein Plasma erzeugt.

Während des Polymerisationsschrittes werden die im vorhergehenden Ätzschritt freigelegten Flächen, also der Ätzgrund und die Seitenflächen, sehr gleichmäßig mit einem Polymer bedeckt. Diese Polymerschicht auf den Ätzkanten bzw. Ätzflächen bildet einen sehr wirkungsvollen vorläufigen Ätzstopp.

Das jeweils im Polymerisationsschritt auf die Ätzkante aufgebrauchte Polymer wird während des nunmehr darauffolgenden zweiten Ätzschrittes teilweise wieder abgetragen. Die beim Weiterätzen freigelegte Kante erfährt bereits während des Ätzschrittes durch vom darüberliegenden Kantenbereich teilweise abgetragenen Polymer lokal einen wirksamen Schutz vor einem weiteren Ätzangriff.

Die bekannte Tendenz freigesetzter Monomere, sich bereits unmittelbar benachbart wieder niederzuschlagen, hat beim erfindungsgemäßen Verfahren die positive Konsequenz, einen zusätzlichen lokalen Kantenschutz beim Weiterätzen zu bewirken. Hieraus ergibt sich, daß die Anisotropie der einzelnen Ätzschritte, die ja getrennt von den Polymerisationsschritten im Plasma erfolgen, durch diesen Effektsignifikant erhöht wird.

Die auf dem Ätzgrund während des Polymerisationsschrittes aufgebrauchte Polymerschicht wird während des darauffolgenden Ätzschrittes rasch durchbrochen, da das Polymer mit der Ionenunterstützung sehr schnell abgetragen wird und die chemische Umsetzung der reaktiven Plasmaspezies mit dem Silicium am Ätzgrund voranschreiten kann.

Die Seitenwände der einzuätzenden Strukturen bleiben während des Ätzschrittes durch das während des Polymerisationsschrittes aufgebrauchte Polymer geschützt.

Die Ätzschritte und die Polymerisationsschritte werden so oft alternierend wiederholt, bis die vorherbestimmte Äztiefe der Strukturen im Siliciumsubstrat erreicht ist. Die Dauer der einzelnen Ätzschritte liegen bei dem mikrowellenunterstützten Verfahren, das eine Ätzgeschwindigkeit zwischen 2 und 20  $\mu\text{m}/\text{min}$  ermöglicht, so, daß pro Ätzschritt z. B. 2 bis 3  $\mu\text{m}$  Tiefe weitergeätzt wird.

Der nachfolgende Polymerisationsschritt wird etwa solange gewählt, daß während der Polymerisationszeit eine ca. 50 nm starke teflonartige Polymerschicht an den Seitenwänden bzw. auf dem Ätzgrund abgeschieden ist. Dafür wird z. B. eine Zeit von einer Minute benötigt.

In vorteilhafter Ausgestaltung des Polymerisationsschrittes wird gleichzeitig mit der Polymeraufbringung eine Ioneneinwirkung auf das Siliciumsubstrat durchgeführt. Dazu wird die Substratelektrode mit einer Hochfrequenzleistung von beispielsweise 3 bis 5 W, die eine Substratvorspannung von ca. 5 V ergibt, beaufschlagt.

Da ohne die Ioneneinwirkung die während des Polymerisationsschrittes abgeschiedenen Polymerschichten während der Ätzschritte nur sehr langsam geätzt — nur wenige Nanometer pro Minute — werden, bietet die gleichzeitige Ioneneinwirkung während des Ätzschrittes den Vorteil, daß die Polymer-Ätzgeschwindigkeit drastisch auf über 100 nm/min gesteigert werden kann. Dies wird selbst dann erreicht, wenn das Siliciumsubstrat auch nur mit einer geringen Ionenenergie, z. B. 5 eV, bombardiert wird.

Wird das Siliciumsubstrat bereits während der Polymerisationsschritte mit geringer Ionenenergie bombardiert, kann auf dem Ätzgrund überhaupt kein Polymer gebildet werden. Die polymerisationsfähigen Monomere reichern sich daher bevorzugt an den Seitenwänden an und entfalten dort einen besonders wirksamen Schutz vor dem darauffolgenden Ätzschritt, wogegen der Ätzgrund frei bleibt von jeglicher Bedeckung.

Beim darauffolgenden Ätzschritt kann also am Ätzgrund ohne Verzug, das heißt ohne vorheriges Abtragen eines Polymerfilms, weitergeätzt werden.

Mit beiden Alternativen, also Ioneneinwirkung nur während der Ätzphase bzw. Ioneneinwirkung während der Ätzphase und der Polymerisationsphase, können Strukturen mit sehr hoher Anisotropie, das heißt mit praktisch genau senkrechten Kantenprofilen, erreicht werden.

Es ist ein besonderer Vorzug, daß ein anisotropes Ergebnis mit außerordentlich niedrigen Ionenenergien erreicht werden kann. Soll während des Polymerisationsschrittes auf dem Ätzgrund kein Polymer deponiert werden, genügen bereits Ionenenergien von nur ca. 5 eV. Bei den Ätzschritten empfiehlt sich ein Ionenbombardement bei Energien zwischen 5 und 30 eV, um den Strukturgrund völlig freizuhalten von Depositionen aus dem Plasma, so daß sich erst keine Ätzgrundrauigkeit einstellen kann.

Werden nur während der Ätzschritte Ionen zum Siliciumsubstrat beschleunigt, so genügen diese auch, um das Ätzgrundpolymer, das sich während der Polymerisationsschritte absetzt, innerhalb von einigen Sekunden zu durchbrechen. Bei dieser Betriebsart wird der Microloading-Effekt in der Ätzgeschwindigkeit noch weiter reduziert.

Die Siliciumätzung an sich erfordert dank der hohen spontanen Umsetzungsgeschwindigkeit von Fluorradikalen mit Silicium keinerlei Ionenunterstützung.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil ergibt sich daraus, daß infolge der nur geringen benötigten Ionenenergien eine ausgezeichnete Maskenselektivität erreicht wird. Ionenenergien in der angegebenen Größenordnung genügen nicht, um die Ätzung der Maskenmaterialien, z. B. Photolack und Siliciumoxid  $\text{SiO}_2$  zu induzieren, da die Aktivierungsenergie für das Aufbrechen chemischer Bindungen im hochgradig vernetzten Maskenpolymer erheblich höher liegt. Ohne ein vorheriges Aufbrechen dieser Bindungen ist es den Ätzspezies jedoch nicht möglich, mit dem Maskenmaterial zu flüchtigen Verbindungen zu reagieren, die anschließend desorbiert werden können.

Da mit dem beschriebenen Verfahren hohe Ätzgeschwindigkeit erreicht werden können, kommt es durch die stark exotherme chemische Umsetzung von Fluorradikalen mit Silicium zu einer Erwärmung des Siliciumsubstrats. Bei entsprechend hohen Temperaturen verlieren die während des Polymerisationsschrittes deponierten Polymere bzw. auch die Maskenmaterialien, z. B. Photolack, ihre Beständigkeit gegenüber den Ätz-

spezies. Daher ist es notwendig, für eine hinreichende Kühlung der Siliciumsubstrate zu sorgen. Dies wird mit an sich bekannten Verfahren, z. B. die Kühlung der Siliciumsubstratrückseite durch einen Heliumgasstrom oder das Aufkleben der Siliciumsubstrate auf gekühlte Siliciumelektroden, erreicht.

Anstelle der beschriebenen Gemische von Schwefelhexafluorid und Argon für die Ätzschritte bzw. von Trifluormethan und Argon für die Polymerisationsschritte können genauso gut für die Ätzschritte andere gebräuchliche, Fluor liefernde Ätzgase, beispielsweise Stickstofftrifluorid  $\text{NF}_3$ , Tetrafluormethan  $\text{CF}_4$  oder ähnliches und für die Polymerisationsschritte Gemische auf Basis von perfluorierten Aromaten mit geeigneten Randgruppen, beispielsweise perfluorierte styrolartige Monomere oder etherartige Fluorverbindungen eingesetzt werden.

Bei allen eingesetzten Medien kommt es lediglich darauf an, hohe Dichten von reaktiven Spezies und Ionen bei gleichzeitig geringer, aber exakt kontrollierbarer Energie zu erreichen, mit der die generierten Ionen die Substrate erreichen.

Die Ionenenergie muß mit Rücksicht auf eine hohe Maskenselektivität so klein wie möglich gehalten werden. Hohe Ionenenergien würden zudem zu störenden Rückwirkungen von zerstäubten oder abgetragenen und unkontrolliert redeponiertem Material führen. Die Energie der auf das Siliciumsubstrat einwirkenden Ionen muß jedoch ausreichen, um den Strukturgrund von Depositionen freizuhalten, damit ein glatter Ätzgrund erreicht werden kann.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum anisotropen Ätzen von vorzugsweise mit einer Ätzmaske definierten Strukturen, insbesondere lateral exakt definierten Ausnehmungen in Silicium, mittels eines Plasmas, **dadurch gekennzeichnet**, daß der anisotrope Ätzvorgang in separaten, jeweils alternierend aufeinanderfolgenden Ätz- und Polymerisationsschritten getrennt durchgeführt wird, welche unabhängig voneinander gesteuert werden, und daß während des Polymerisationsschrittes auf die durch die Ätzmaske definierte laterale Begrenzung der Strukturen ein Polymer aufgebracht wird, das während des nachfolgenden Ätzschrittes teilweise wieder abgetragen wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Ätzschritte ohne Polymerbildner im Plasma durchgeführt werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Ätzschritte über eine Zeitspanne, die die Äztiefe bestimmt, durchgeführt werden.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Polymerisationsschritte über eine die Dicke der Polymerabscheidungen bestimmende Zeitspanne durchgeführt werden.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Siliciumsubstrate während der Ätzschritte mit einer Ionenenergie bombardiert werden.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Siliciumsubstrate wahlweise während der Polymerisationsschritte mit einer Ionenenergie bombardiert

werden.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß man die Ionenenergie während der Ätzschritte zwischen 1 und 50, vorzugsweise zwischen 5 und 30 eV wählt.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß man die Ionenenergie während der Polymerisationsschritte zwischen 1 und 10, vorzugsweise 4 bis 6, insbesondere 5 eV wählt.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß für die Ätzschritte Fluor liefernde Ätzgase eingesetzt werden.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß für die Ätzschritte ein Gemisch von Schwefelhexafluorid  $\text{SF}_6$  und Argon Ar eingesetzt wird.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß für die Polymerisationsschritte Fluorkohlenwasserstoffe mit vorzugsweise niedrigem Fluor-zu-Kohlenstoff-Verhältnis eingesetzt werden.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß für die Polymerisationsschritte ein Gemisch von Trifluormethan  $\text{CHF}_3$  und Argon Ar eingesetzt wird.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß man für die in den Ätzschritten und Polymerisationsschritten eingesetzten Medien Gasflüsse von 0 bis 100 Norm- $\text{cm}^3$  und Prozeßdrücke von 10 bis 100  $\mu\text{bar}$  wählt.

14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Plasmaerzeugung mit Mikrowelleneinstrahlung bei Leistungen zwischen 100 und 1500 W vorzugsweise 300 bis 1200 W erfolgt.

15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Siliciumsubstrate während der Ätzschritte und/oder Polymerisationsschritte gekühlt werden.

16. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Siliciumsubstrate rückseitig mit einem Heliumgassstrom beaufschlagt werden.

17. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, die Siliciumsubstrate über ein Wärmekontaktmaterial auf eine gekühlte Substratelektrode aufgebracht werden.

18. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Ätzschritte und Polymerisationsschritte mit einer hohen Plasmadichte der reaktiven Spezies und Ionen durchgeführt werden.

19. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Plasmadichte und die Ionenenergie unabhängig voneinander geregelt werden.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

